心理学报 2023, Vol. 55, No. 7, 1−14
Acta Psychologica Sinica

https://doi.org/10.3724/SP.J.1041.2023.001

奖赏预测误差对时间顺序记忆和来源记忆的影响*

张弘弛 成 旋 毛伟宾
(山东师范大学心理学院, 济南 250358)

摘 要 先前研究表明, 事件边界会增强边界处来源记忆、削弱跨边界的时间顺序记忆, 但对于两者之间是否存在一种权衡关系, 以及内在的、具有社会性意义的变化作为事件边界是如何影响记忆的, 尚鲜有研究。本研究以奖赏预测误差(reward prediction errors, RPE)作为事件边界, 通过两个行为实验和一个 ERP 实验, 探讨 RPE 事件边界对时间顺序记忆和来源记忆的影响。结果发现, RPE 事件边界增强了边界处信息的来源记忆, 高 RPE 事件边界引发了记忆权衡效应; 相对于事件内/非边界条件, 跨事件/边界条件记忆的正确提取诱发出更大的 N400 波幅, 时间顺序记忆的激活主要集中在头皮中前部, 来源记忆的激活主要集中在头皮中后部。本研究表明, 事件边界的切分强度是影响记忆权衡效应的重要因素, N400 成分可能是反映事件边界对情景记忆的整合与切分的重要指标。
关键词 奖赏预测误差, 事件边界, 时间顺序记忆, 来源记忆, 记忆权衡效应
分类号 B842

1 引言

日常生活中, 个体在回忆过去的连续经验时通常记住的是单独、离散的事件, 这些事件是构成情景记忆的基本单元(Tulving, 1983)。比如, 当回忆早上的情形时, 我们能够回想起在家里吃早餐这一完整的事件, 而当走出家门去上班时, 周围环境发生变化, 此时又构成了另一个事件。Zacks 等人(2001)将人脑中把连续的外界信息切分成若干个有意义且互相关联的事件的过程称做事件切分(event segmentation), 连续信息被切分成不同事件的时间点就是事件边界(event boundary), 它标志着前一事件的结束和后一事件的开始(Radvansky & Zacks, 2017; Zacks et al., 2007)。大量研究表明, 事件边界对情景记忆的时间和非时间层面产生了不同的影响(Clewett et al., 2019), 具体表现为事件边界削弱了记忆的时间层面, 而增强了记忆的非时间层面(Davis et al., 2021; DuBrow & Davachi, 2013; Ezzyat & Davachi, 2011, 2014; Horner et al., 2016; Lin et al., 2010; Siefke et al., 2019)。

事件边界影响记忆时间层面的研究主要集中在时间顺序记忆和时间距离判断上(DuBrow & Davachi, 2013; Ezzyat & Davachi, 2011, 2014; Horner et al., 2016)。时间顺序记忆是指对已经历的事件时间发生顺序的记忆, 通常采用新近性判断(recency judgment)来测量, 具体操作是要求被试在测验阶段判断两个待测项中的哪一个相对更早呈现。结果发现, 相比较事件内的项目, 当项目分别位于事件边界两侧时, 其顺序捆绑会受到削弱, 即跨事件边界的项目间的时间顺序记忆会变差。Ezzyat 和 Davachi (2011)在叙事文本中逐句呈现句子材料, 以叙事文本中的时空情境变化作为事件边界, 如“A while later...”表示跨事件边界条件, “A moment later...”表示事件内条件。随后呈现前一语句作为线索, 要求被试回忆紧随的下一语句。结果发现, 相对于事件内条件, 跨事件边界条件下的句

收稿日期: 2022-09-15
* 山东省自然科学基金项目(ZR2021MC081)资助。
通信作者: 毛伟宾, E-mail: wb_mao@163.com

子记忆准确性明显更差。DuBrow 和 Davachi (2013)让被试学习一系列客体图片，以中间插入面孔图片作为事件边界，即连续的几张客体图片构成一个事件，面孔图片将其切分成不同的事件。结果也发现，与事件内的项目对相比，跨事件边界的项目对的时间顺序记忆明显更差。Horner 等人(2016)采用虚拟现实技术，通过操纵房间位置的变化以形成空间事件边界，穿过房间意味着存在事件边界，结果和先前研究完全一致。采用个体主观评估项目间时间距离的研究也发现，事件边界扩大了个体对项目间时间距离的判断(Ezzyat & Davachi, 2014)。Ezzyat 和 Davachi (2014)首次以场景图片转换作为事件边界，探讨了与作为背景的场景图片同时呈现的项目图片的时间距离判断。连续呈现几张相同的场景图片为事件内条件，场景图片发生变化时则为跨事件边界条件。结果发现，尽管两项目间的实际距离相同，被试在事件内条件下更倾向于反应为“近”，而在跨事件边界条件下更倾向于反应为“远”。事件边界使个体主观上认为信息间的时间距离变远。这说明，无论是客观的时间顺序记忆，还是主观的时间距离判断，均受事件边界的影响。而且上述研究可以看出，事件边界的种类繁多，泛指一切将不同事件区分开的特征变化，个体在感知到信息的特征发生变化后，会进一步对类别改变做出判断，此时就形成了事件边界。显然，事件边界把过去的连续经验分离成不同的要素，干扰了记忆的时间层面，割裂了相邻事件之间的联系，从而削弱了跨事件信息间的整合加工(Clewett & Davachi, 2017; Clewett et al., 2019; Ezzyat & Davachi, 2021)。

研究表明，事件边界在记忆的非时间层面表现出一定的记忆优势，具体为能提高边界处信息的项目以及来源记忆(Lin et al., 2010; Siefke et al., 2019)。来源记忆是指对项目及其情境(context)信息的记忆，如对项目及其所属背景颜色的记忆等(Tulving, 2002)。Lin 等人(2010)让被试学习一系列与字母配对呈现的场景图片，以字母颜色的变化作为事件边界。结果发现，字母颜色变化时的场景图片的再认准确性显著好于其他场景图片，事件边界提高了对边界处图片的项目再认。Siefke 等人(2019)则以单词列表作为实验材料，以单词的背景颜色变化作为事件边界来研究来源记忆。结果发现，边界处项目的单词−颜色来源记忆显著优于非边界项目。该研究进一步表明，事件边界增强了边界处信息与其情境之间的联结捆绑。

如前所述，事件边界削弱了记忆的时间层面，却增强了记忆的非时间层面，那么这种增强和削弱之间是否存在某种权衡关系呢？Heusser 等人(2018)首次在 3 个实验中系统地探讨了事件边界中时间顺序记忆和来源记忆的关系。该研究采用背景颜色的变化来构成事件边界，进行了时间顺序记忆和项目−背景颜色来源记忆测验。结果发现，边界条件的项目−背景颜色来源记忆显著优于非边界条件，而跨事件条件下的时间顺序记忆则显著差于事件内条件。也就是事件边界增强了边界处的来源记忆，却削弱了跨边界的时间顺序记忆。据此，他们认为，事件边界对来源记忆和时间顺序记忆的影响可能存在权衡效应。Clewett 等人(2020)以听觉声道和音调转换作为事件边界，即被试在学习每张客体图片时单侧耳会听到某一音调的纯音，事件转换时在对侧耳听到另一音调的纯音。也发现听觉事件边界能同时增强边界处信息的来源记忆、削弱跨事件信息的时间顺序记忆以及增加时间距离估计。然而，最近的研究发现，事件边界对时间顺序记忆的削弱并不总会导致来源记忆的增强。van de Ven 等人(2022)以序列学习过程中刺激间隔(Inter-stimulus interval, ISI)的时间变化作为事件边界，即连续的几张客体图片拥有相同的 ISI 以形成一个事件。结果发现，跨事件条件的时间顺序记忆显著差于事件内条件，但边界与非边界项目的来源记忆并未存在显著差异。可能 ISI 事件边界是一种不同类型的事件边界，不同于以往研究中所采用的视觉或听觉变化等知觉边界，才导致没有提高边界处项目的来源记忆，进而没有产生记忆权衡效应。因此，不同类型的事件边界是否均能产生记忆权衡效应，以及事件边界产生记忆权衡效应是否受到其他因素的影响有待于进一步探究。

此外，先前研究大多采用空间、知觉、类别特征等外部环境变化导致的事件边界，很少研究内在的、具有社会性意义的变化能否作为事件边界及如何影响记忆。Rouhani 等人(2020)通过 4 个实验首次证明了奖赏预测误差(reward prediction errors, RPE)可以作为事件边界对记忆产生影响。所谓奖赏预测误差，是指预期与实际获得奖赏间的差异。由于个体的动机源自大脑的奖赏机制，因此会关注各种奖赏，并依据以往经验对即将到来的奖赏进行预期，如果与预测不一致，则产生奖赏预测误差(Schultz et al., 1997)。与先前研究不同，人脑对奖赏信息十分敏感，RPE 更多体现的是个体内部心理体验的变

化, 通常伴随着激素水平的上升。研究表明, 中脑奖赏系统的腹侧被盖区(VTA)产生的多巴胺会投射至海马, 从而导致对非预期事件的记忆增强(Lisman et al., 2011; Jang et al., 2019)。由此, 探讨 RPE 能否形成事件边界并对记忆的时间和非时间层面产生影响不仅有助于丰富事件边界的类型, 进一步考察内在和外在的事件边界对记忆的影响是否不同, 而且对于厘清事件边界的加工机制也具有重要的意义。据此, Rouhani 等人(2020)给被试呈现一系列中性场景图片, 每张图片都与一个价值数值配对, 事件边界被设置为价值数值发生很大变化。连续几张场景图片所匹配的价值数值围绕某一个平均值上下波动, 即事件内; 而在事件边界处, 与场景图片配对的价值数值的平均值会发生较大转换。测验采用启动范式, 先后呈现两张图片, 第一张为启动项, 第二张为目标项, 要求被试对两张图片做“新/旧”再认。结果发现, 在启动项呈现后, 相比较事件内条件, 对事件边界处的目标项做“新/旧”再认的速度明显减慢, 这表明 RPE 切断了启动项和目标项之间的关联, 形成了事件边界。在证明了 RPE 可以作为事件边界之后, 他们又在实验 4 中进一步检验了 RPE 事件边界如何影响记忆的时间层面, 这是因为事件边界在记忆中存在的一个重要证据就是表现为跨事件时间顺序记忆的削弱(Davachi & DuBrow, 2015)。测验阶段给被试呈现两张场景图片, 两张图片所属价值数值的平均值要么是相同的, 要么是不同的。首先要求被试判断两张图片中的哪一张最先呈现, 然后指出其在学习阶段间隔多少张图片。结果发现, 跨事件条件下的时间顺序记忆显著低于事件内条件, 而时间距离判断并未存在显著差异。进一步表明 RPE 事件边界削弱了跨事件信息的时间顺序记忆, 时间距离判断和时间顺序记忆分别作为记忆时间层面的主客观测量可能分属不同的记忆系统。但在该研究中, 只探讨了事件边界对记忆时间层面的影响, 并未探讨事件边界对记忆非时间层面同时产生何种影响。因此, 考察 RPE 事件边界在削弱跨事件时间顺序记忆的同时能否增强边界处的来源记忆, 对于进一步检验记忆权衡效应是否适用于不同类型的事件边界是十分重要的。

另外, 采用 ERP 技术探讨事件边界影响记忆的神经生理机制的研究较为鲜见, 且有不同发现。研究表明, N400 成分与预期违背密切相关(DeLong et al., 2005; Kutas & Hillyard, 1980, 1984; Sitnikova et al., 2003; West & Holcomb, 2002)。即如果随后输入的信息是非预期的、不可预测的, 此时就会产生较大的 N400 波幅。因此, Zacks 等人(2007)认为事件边界处个体无法对随后输入的信息进行准确预测, 和预期违背有关的 N400 成分在事件边界中可能具有重要的作用。Delogu 等人(2018)对此也进一步推论, N400 成分与词在句子或语篇语境中的预期程度有关, 相比较于事件边界处的信息, 事件内的信息会诱发出更低的 N400 波幅, 体现了更容易的提取过程。此外, Delogu 等人(2018)还认为 P600 成分意味着建立了新的表征, 可以视为边界处事件模型更新的标志。在该研究中, 要求被试逐句阅读简单或详细描述日常活动的语篇故事, 通过呈现不可预测的目标词来探讨事件边界中的 N400 和 P600 效应。其中详细描述意味着讲述了一个完整的故事或事件, 随后呈现的信息是对其他事件的描述, 即跨事件; 而简单描述则体现在同一事件之中, 即事件内。结果发现, 无论是事件内还是跨事件条件, 被试阅读到不可预测的目标词时便产生更大的 N400 波幅; 而仅在跨事件条件下才产生更大的 P600 波幅。他们认为与 N400 成分相比, P600 成分反映了正在维持和整合的心理表征的修正, 体现了事件边界处的全局性(global)更新过程。那么, RPE 作为一种内在的、具有社会性意义的事件边界是否也会诱发 N400 和 P600 波幅呢? 因此, 探讨 RPE 事件边界影响记忆的神经生理机制是十分有必要的。

综上所述, 本研究拟采用行为和 ERP 技术, 通过中性场景图片和价值数值相配对的形式, 在 3 个实验中深入探讨 RPE 事件边界对不同条件的时间顺序记忆和来源记忆的影响。实验 1 提出一种用于检验 RPE 事件边界的来源记忆的操作, 探讨 RPE 事件边界能否产生时间顺序记忆和来源记忆的记忆权衡效应; 实验 2 在实验 1 的基础上, 区分高、低 RPE 转换强度, 探讨了不同强度的 RPE 事件边界对时间顺序记忆和来源记忆的影响是否存在差异; 实验 3 以高转换强度 RPE 为事件边界, 以 N400 和 P600 成分为指标, 进一步探讨了 RPE 事件边界对时间顺序记忆和来源记忆影响的神经生理机制。

2　实验 1: RPE 事件边界对时间顺序记忆和来源记忆的影响

本实验旨在考察 RPE 作为事件边界时, 对跨事件/边界和事件内/非边界信息的时间顺序记忆和来源记忆的影响。

2.1 方法

2.1.1 被试

采用 G*power 3.1，设置统计检验力为 0.8，α 水平为 0.05，效应量为中等水平(f = 0.25)，计算出的被试量为 24 人。选取山东师范大学在校学生 30 名(男生 12 名，女生 18 名，年龄 20.2 ± 1.85 岁)。所有被试视力或矫正视力正常，均为右利手，自愿参加本次实验，并且此前从未参加过类似实验，结束后获得一定的报酬。

2.1.2 实验材料

实验 1~3 由 300 张中性场景图片和价值数值(平均值范围从¥10~¥90)配对组成，价值数值位于中性场景图片的上方。其中中性场景图片是从中国情绪图片系统(CAPS) (白露 等, 2005)和国际情绪图片系统(IAPS) (Lang et al., 2008)以及网络图片库中选取的。价值数值采用人民币为单位的钱币数值，这些数值均是围绕某一个平均值上下波动的，平均值范围从¥10 到¥90，并且每¥10 为一单位。根据 Heusser 等人(2018)的研究，图片大小统一为 350 × 350(像素)。实验材料示例见图 1。

2.1.3 实验设计

采用 2 (条件：跨事件/边界、事件内/非边界) × 2 (测验类型：时间顺序记忆、来源记忆)的被试内实验设计，因变量为时间顺序记忆和来源记忆的正确率。

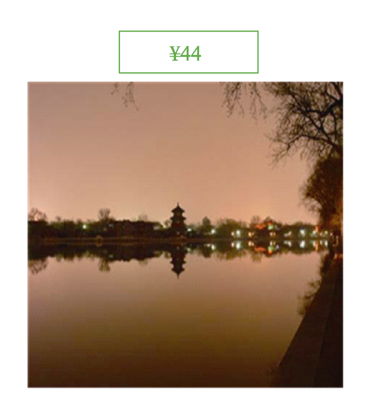
2.1.4 实验程序

实验程序的编制以及实验的运行均通过 E-Prime 3.0 软件完成。实验分为学习阶段和测验阶段，共分为 6 个 block。

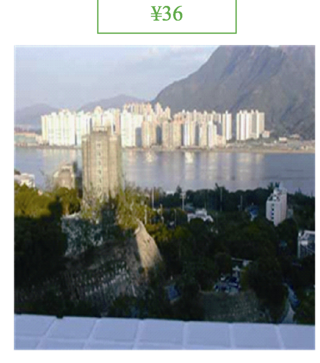
学习阶段：首先在屏幕中央呈现注视点“+”为 0.5 s，随后呈现中性场景图片和与之配对的价值数值 3 s，之后是下一个试次，直至一个 block 循环结束。本研究参照 Rouhani 等人(2020)的做法，以 RPE 作为事件边界。每个 block 共包含 36 个试次，由 5~6 个事件组成。每个事件为 5~9 个试次，事件内各试次的价值数值围绕某一平均值上下浮动、保持相对稳定，如事件内价值数值为“¥44~¥37~¥40~¥39......”，这些价值数值均围绕平均值“¥40”波动。当事件转换时，即出现事件边界、进入一个新的事件时，围绕平均值波动的价值数值发生较大改变，如“¥42~¥36~¥72~¥71......”，这时，价值数值从平均值“¥40”转换到了平均值“¥70”便发生了事件转换。不同事件之间的 RPE 转换的平均值是在¥20~¥80 之间，每¥10 为一单位，即每次发生事件转换时，RPE 的平均值都是¥10 的整数倍。

测验阶段：学习完一个 block 之后，被试需要完成时间顺序记忆和来源记忆两项记忆测验，这两种测验的先后顺序进行了被试间平衡。时间顺序记忆测验是要求被试对两张学习过的场景图片中的哪一张在学习阶段相对较早呈现做按键反应判断。其中跨事件和事件内条件各 6 个试次，跨事件条件指两张场景图片在学习阶段分属同一 block 的两个不同的事件，而事件内条件的两张图片则在同一事件之中，无论是跨事件还是事件内条件，图片对之间的间隔均为 3 个试次，即 lag-3 (Heusser et al., 2018; Rouhani et al., 2020)。来源记忆测验则是给被试呈现一张学习过的场景图片，在其下方有两个价值数值，其中一个数值是学习阶段该图片所属事件的价值区间，另一个数值是同一 block 中其他事件的价值数值，要求被试从这两个数值中选出学习阶段与该图片一起呈现过的较为接近的那个数值，并在电脑上做按键反应。其中边界项和非边界项条件各 4 个试次，边界项条件指新事件的第一项，其余试次为非边界项条件。此外，时间顺序记忆测验和来源记忆测验的先后顺序、时间顺序记忆测验中两项目的位置以及来源记忆测验中两数值的位置也都进行了被试间平衡。实验流程见图 2。

¥44



¥36



¥72



图 1 实验材料示例

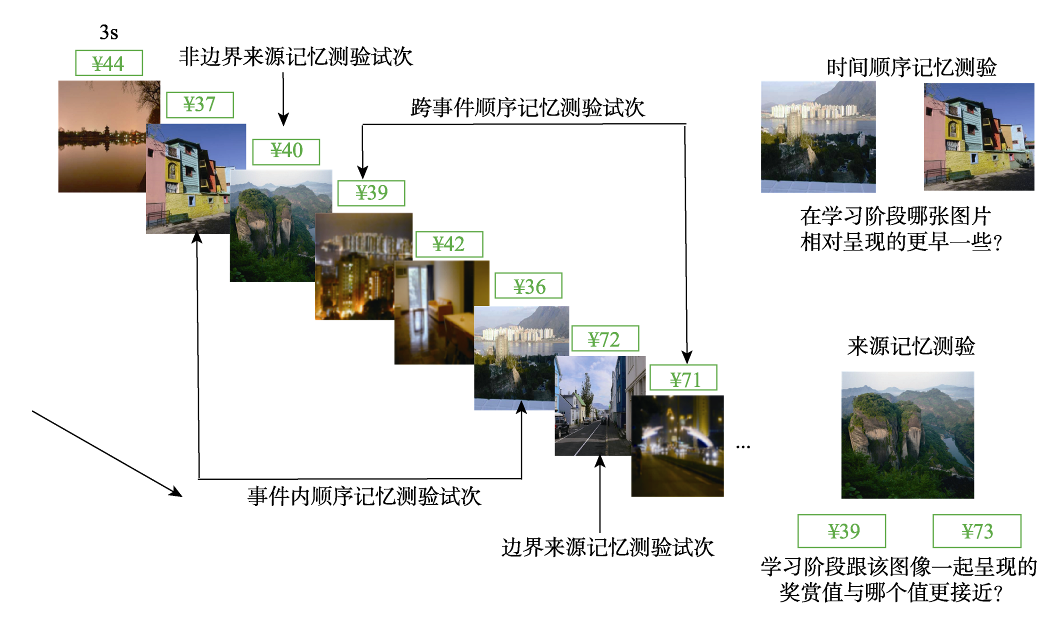


图 2　实验流程(左侧为学习阶段, 右侧为测验阶段)

2.2　实验结果

对时间顺序记忆和来源记忆正确率进行 2 (条件: 跨事件/边界、事件内/非边界) × 2 (测验类型: 时间顺序记忆、来源记忆)的重复测量方差分析。结果发现, 测验类型主效应显著, 来源记忆的正确率显著高于时间顺序记忆, $F(1, 29) = 39.71$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.58$, 95% CI = [0.07, 0.14]。条件主效应不显著, $F(1, 29) = 3.81$, $p = 0.06$。测验类型和条件交互作用显著, $F(1, 29) = 21.51$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.43$, 进一步的简单效应分析发现, 跨事件条件的时间顺序记忆正确率与事件内条件无显著差异($t(29) = -1.17$, $p = 0.25$); 边界条件的来源记忆正确率显著高于非边界条件, $t(29) = 4.00$, $p < 0.001$, Cohen's $d = 0.73$, 95% CI = [0.05, 0.15]。具体结果见表 1 和图 3。

表 1　跨事件/边界和事件内/非边界的时间顺序记忆和来源记忆正确率($M \pm SD$)

测验类型	跨事件/边界	事件内/非边界
时间顺序记忆	0.56 ± 0.09	0.59 ± 0.09
来源记忆	0.73 ± 0.10	0.63 ± 0.13

2.3　讨论

首先, 本研究拓展了 Rouhani 等人(2020)的研究, 提出了一种用于检验来源记忆的操作, 结果 RPE 事件边界的确提高了边界处场景图片−价值数值来源记忆, 与先前大多数研究结果一致(Ben-Yakov et al., 2022; Braun et al., 2018; Siefke et al., 2019), 进一步验证了 RPE 事件边界能够增强边界处信息的来源记忆。Siefke 等人(2019)通过采用高、低频率背景颜色变化的单词列表考察单词−背景颜色来源记忆的研究也表明, 预期误差造成的事件边界本身是边界处来源记忆增强的原因。

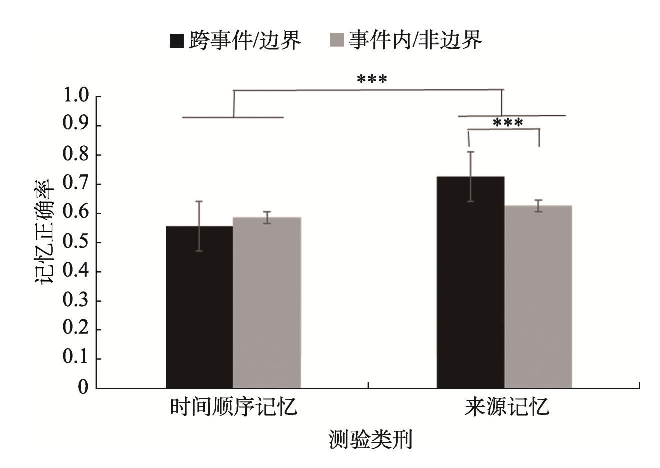


图 3　跨事件/边界和事件内/非边界的时间顺序记忆和来源记忆正确率

注: 误差线为标准误, *$p < 0.05$, **$p < 0.01$, ***$p < 0.001$。下同

其次, 对于时间顺序记忆来说, RPE 事件边界没有削弱跨事件信息的时间顺序记忆, 与 Rouhani 等人(2020)的研究结果不一致, 而且我们的结果也没发现 Heusser 等人(2018)发现的记忆权衡效应, 这说明事件边界对记忆的影响是存在边界条件的。我们对实验 1 的结果进行了分析, 发现尽管不同事件之间的 RPE 转换平均值是从¥20~¥80, 但是会存在从平均值¥20 到¥40 或¥50 这种转换变化比较小的试次, 也会出现从平均值¥20 到¥70 或¥80 这种转换变化比较大的试次, 这样就导致了 RPE 的强度高低出现差异。而 RPE 的低强度转换可能不能很

好地发挥出事件边界的作用，这也可能是实验中没有发现事件边界对时间顺序记忆的削弱作用和没有表现出记忆权衡效应的原因。因此，在实验 2 中，通过操纵 RPE 高、低强度，进一步探讨不同强度的 RPE 事件边界对时间顺序记忆和来源记忆的影响是否存在差异。

3　实验 2：不同转换强度的 RPE 事件边界对时间顺序记忆和来源记忆的影响

本实验旨在考察不同转换强度的 RPE 事件边界对跨事件/边界和事件内/非边界信息的时间顺序记忆和来源记忆的影响。

3.1　方法

3.1.1　被试

同实验 1。其中男生 7 名，女生 23 名，年龄 20.7 ± 2.04 岁。

3.1.2　实验材料

见实验 1。

3.1.3　实验设计

采用 2 (RPE 转换强度：高转换强度、低转换强度) × 2 (条件：跨事件/边界、事件内/非边界) × 2 (测验类型：时间顺序记忆、来源记忆)的被试内实验设计，因变量为时间顺序记忆和来源记忆的正确率。

3.1.4　实验程序

实验开始之前，随机选取 15 名不参与正式实验的被试对 RPE 边界的转换强度在 9 点量表上进行主观评定，从 1 (完全感知不到变化)到 9 (完全能感知到变化)，转换强度就是两个相邻事件之间平均值的差值大小。根据评定的结果，最终选择评分小于 5 的¥20 和¥30 (3.73 ± 1.33; 4.24 ± 0.88)作为低 RPE 转换强度条件；评分大于 6 的¥50 和¥60 (7.07 ± 1.44; 6.33 ± 1.23)作为高 RPE 转换强度条件。

实验共 10 个 block，其中 5 个 block 为低转换强度条件，5 个 block 为高转换强度条件。每个 block 分为学习阶段和测验阶段。

学习阶段：和实验 1 的区别在于，每个 block 共包含 30 个试次，由 5 个事件组成，每个事件为 5~7 个试次。不同事件之间的 RPE 转换范围区分为高、低强度，其中低转换强度为¥20 和¥30，高转换强度为¥50 和¥60。也就是说，两个相邻事件之间平均值的转换大小包括低转换强度，如从平均值“¥10”转换成平均值“¥30”，以及高转换强度，如从平均值“¥10”转换成平均值“¥70”。其他设置均同实验 1。学习阶段实验流程如图 4 所示。

测验阶段：同实验 1。

3.2　实验结果

对时间顺序记忆和来源记忆正确率进行 2 (RPE 转换强度：高强度、低强度) × 2 (条件：跨事件/边界、事件内/非边界) × 2 (测验类型：时间顺序记忆、来源记忆)的重复测量方差分析。结果发现，RPE 转换强度主效应显著，低转换强度的记忆正确

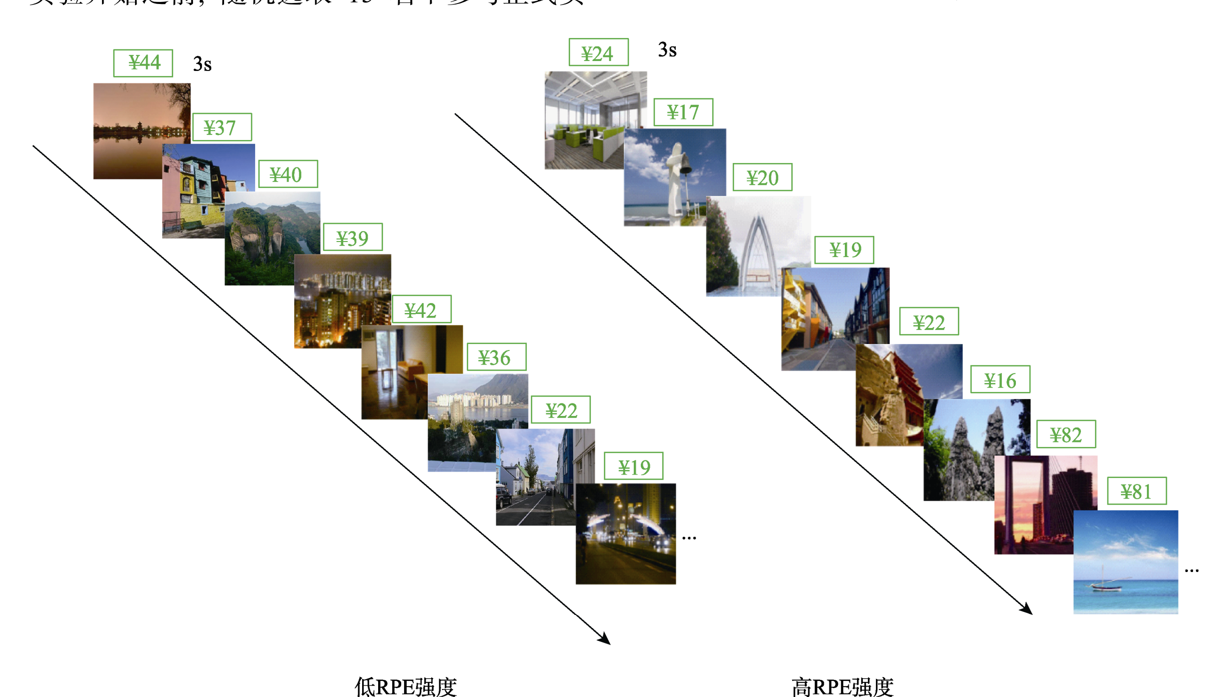


图 4　学习阶段实验流程

率显著高于高转换强度, $F(1, 29) = 4.10$, $p = 0.05$, $\eta_p^2 = 0.12$, 95% CI = [0.00, 0.07]。测验类型主效应显著, 来源记忆的正确率显著高于时间顺序记忆, $F(1, 29) = 30.10$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.51$, 95% CI = [0.07, 0.16]。测验类型和条件交互作用显著, $F(1, 29) = 9.47$, $p = 0.005$, $\eta_p^2 = 0.25$, 进一步的简单效应分析发现, 跨事件条件的时间顺序记忆正确率显著低于事件内条件, $t(29) = -2.83$, $p = 0.008$, Cohen's $d = -0.52$, 95% CI = [−0.11, −0.02]; 边界条件的来源记忆正确率与非边界条件无显著差异($t(29) = 1.61$, $p = 0.12$)。其他主效应和二因素交互作用均不显著, $Fs < 1.67$, $ps > 0.21$。

特别是, 三因素交互作用显著, $F(1, 29) = 8.99$, $p = 0.006$, $\eta_p^2 = 0.24$。进一步对高、低转换强度条件下的记忆正确率分别进行 2 (条件: 跨事件/边界、事件内/非边界) × 2 (测验类型: 时间顺序记忆、来源记忆)的重复测量方差分析。结果发现, 在高转换强度条件下, 测验类型主效应显著, 来源记忆的正确率显著高于时间顺序记忆, $F(1, 29) = 24.15$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.45$, 95% CI = [0.07, 0.16]。条件主效应不显著, $F(1, 29) = 0.72$, $p = 0.40$。测验类型和条件交互作用显著, $F(1, 29) = 16.15$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.36$, 进一步的简单效应分析发现, 跨事件条件的时间顺序记忆正确率显著低于事件内条件, $t(29) = -3.07$, $p = 0.005$, Cohen's $d = -0.56$, 95% CI = [−0.16, −0.03]; 边界条件的来源记忆正确率显著高于非边界条件, $t(29) = 2.87$, $p = 0.008$, Cohen's $d = 0.52$, 95% CI = [0.02, 0.11]。在低转换强度条件下, 测验类型主效应显著, 来源记忆的正确率显著高于时间顺序记忆, $F(1, 29) = 21.74$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.43$, 95% CI = [0.07, 0.17]。条件主效应和交互作用均不显著, $Fs < 1.01$, $ps > 0.32$。具体结果见表 2 和图 5。

表 2 不同 RPE 转换强度的跨事件/边界和事件内/非边界的时间顺序记忆和来源记忆正确率($M \pm SD$)

RPE 转换强度	测验类型	跨事件/边界	事件内/非边界
高转换强度	时间顺序记忆	0.52 ± 0.13	0.62 ± 0.12
	来源记忆	0.71 ± 0.15	0.65 ± 0.15
低转换强度	时间顺序记忆	0.58 ± 0.11	0.61 ± 0.10
	来源记忆	0.71 ± 0.14	0.72 ± 0.14

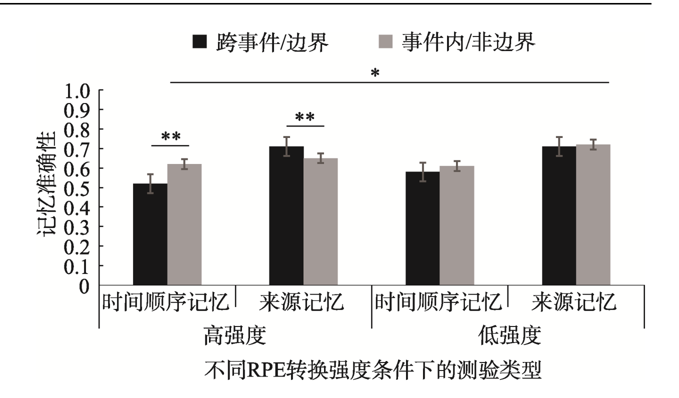


图 5 不同 RPE 转换强度下跨事件/边界和事件内/非边界的时间顺序记忆和来源记忆正确率

3.3 讨论

实验结果表明, 仅在高转换强度条件下出现了时间顺序记忆和来源记忆的权衡效应。具体表现为, 高 RPE 事件边界增强了边界处试次的场景图片−价值数值来源记忆, 同时削弱了跨事件图片对的时间顺序记忆, 与先前的研究结果完全一致(Clewett et al., 2020; Heusser et al., 2018)。实验 2 进一步验证了之前的推测, 即实验 1 中未表现出记忆权衡效应的确是由于低强度切分混淆了高强度切分的效果造成的, 这与 Gurguryan 等人(2020)的研究也是一致的。我们将在总讨论部分对此进行详细论述。

因此, 事件边界的切分强度是影响记忆权衡效应出现的重要因素, 也就是说, 只有当事件之间的表征差异足够大或事件边界的强度足够强时, 事件边界对时间顺序记忆和来源记忆的权衡效应才会出现。如果事件边界的切分效果较弱, 此时事件边界并不会产生关于时间顺序记忆和来源记忆此消彼长的制约作用。

4 实验 3: 高 RPE 事件边界对时间顺序记忆和来源记忆影响机制: ERP 研究

本实验采用脑电技术, 选取 N400 和 P600 两个 ERP 成分, 通过分析记忆提取阶段的 ERP 波幅, 探讨高 RPE 事件边界影响时间顺序记忆和来源记忆的神经生理机制。

4.1 方法

4.1.1 被试

选取山东师范大学在校学生 24 名, 所有被试视力或矫正视力正常, 均为右利手, 自愿参加本次实验, 并且此前从未参加过类似实验, 结束后获得一定的报酬。其中 2 名被试在实验过程中因伪迹过多、数据不完整被剔除。最终保留被试 22 名, 其中男生 5 名, 女生 17 名, 年龄 21.0 ± 1.88 岁。

4.1.2 实验材料

同实验 2。

4.1.3 实验设计

采用 2 (条件: 跨事件/边界、事件内/非边界) × 2 (测验类型: 时间顺序记忆、来源记忆)的被试内实验设计, 因变量为时间顺序记忆和来源记忆的正确率和脑电数据。

4.1.4 实验程序

本实验在学习阶段不同事件之间的 RPE 转换范围仅采用实验 2 中的高转换强度条件, 即转换范围为¥50~¥80。实验共 20 个 block。为叠加出稳定的 ERP 波形, 在学习和测验阶段, 每张图片均会重复出现两次。图片在第一次全部呈现完之后才会以随机的顺序再次重复出现, 并且重复呈现的场景图片与价值数值的配对也会和之前的 block 有所不同。

4.1.5 EEG 数据记录和分析

采用 BP 脑电设备, 根据国际 10~20 系统采集和记录 64 个电极点相应的 EEG 数据。数据采集时, 在线参考点位于 Fz 电极, 接地点位于 FPZ 和 FZ 连线的中点。采样频率为 500 Hz, 带通滤波为 0.1~40 Hz。所有电极头皮电阻均在 10 kΩ 以下。利用 MATLAB 2013 软件中的 EEGLAB 工作箱进行离线数据分析, 重新参考双侧乳突(TP9 和 TP10)的平均电压进行校正, 通过独立成分分析(ICA)后去除所有电极点上的眼电、肌电等伪迹, 伪迹剔除标准为 ± 100 μV。ERP 分段时程为−200~1000 ms, 测验阶段刺激呈现前 200 ms 的平均波幅作为基线, 只对每种条件正确的试次进行叠加平均。跨事件时间顺序记忆、事件内时间顺序记忆、边界来源记忆以及非边界来源记忆条件下的平均叠加试次数量分别为 46、49、58、54。

参照 Delogu 等人(2018)的研究以及对 ERP 波形图的分析, 我们最终选定 350~550 ms 和 600~1000 ms 两个时间窗, 根据区域合并电极点形成头皮中前部(F3、Fz、F4), 中部(C3、Cz、C4)和中后部(P3、Pz、P4)3 个脑区。在叠加出各电极点的平均波幅后, 分别对每个脑区的 3 个电极点的波幅取平均值代表该脑区的平均波幅。采用 SPSS 26.0 软件对不同条件下的 ERP 平均波幅进行重复测量方差分析, 并使用 Greenhouse-Geisser 方法对 p 值进行校正。

4.2 实验结果

4.2.1 行为结果

对时间顺序记忆和来源记忆正确率进行 2(条件: 跨事件/边界、事件内/非边界) × 2(测验类型: 时间顺序记忆、来源记忆)的重复测量方差分析。结果发现, 测验类型主效应显著, 来源记忆的正确率显著高于时间顺序记忆, $F(1, 21) = 45.59$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.69$, 95% CI = [0.07, 0.13]。条件主效应不显著, $F(1, 21) = 0.11$, $p = 0.74$。测验类型和条件交互作用显著, $F(1, 21) = 33.60$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.62$, 进一步的简单效应分析发现, 跨事件条件的时间顺序记忆正确率显著低于事件内条件, $t(21) = −2.94$, $p = 0.008$, Cohen's $d = −0.63$, 95% CI = [−0.06, −0.01]; 边界条件的来源记忆正确率显著高于非边界条件, $t(21) = 3.31$, $p = 0.003$, Cohen's $d = 0.71$, 95% CI = [0.02, 0.07]。具体结果见表 3 和图 6。

表 3 跨事件/边界和事件内/非边界的时间顺序记忆和来源记忆正确率($M \pm SD$)

测验类型	跨事件/边界	事件内/非边界
时间顺序记忆	0.58 ± 0.07	0.62 ± 0.08
来源记忆	0.72 ± 0.09	0.68 ± 0.09

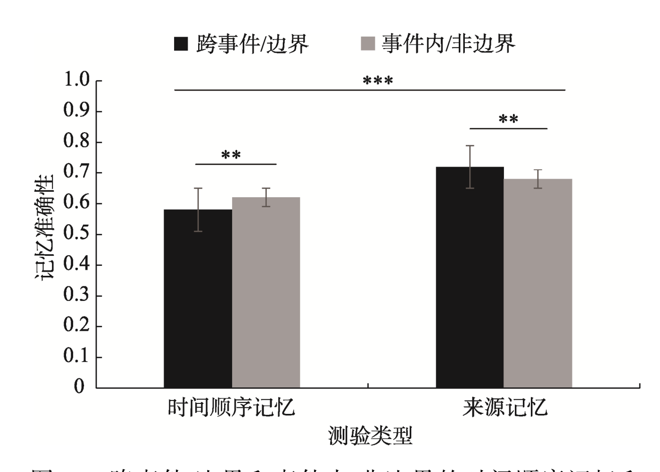


图 6 跨事件/边界和事件内/非边界的时间顺序记忆和来源记忆正确率

4.2.2 ERP 结果

N400 (350~550 ms)

对不同条件下的 ERP 平均波幅进行 2 (条件: 跨事件/边界、事件内/非边界) × 2 (测验类型: 时间顺序记忆、来源记忆) × 3 (脑区: 中前部、中部、中后部)的重复测量方差分析。结果发现, 测验类型主效应不显著, $F(1, 21) = 0.15$, $p = 0.70$。条件主效应显著, 跨事件/边界条件相比事件内/非边界条件诱发更大的 N400 波幅, $F(1, 21) = 6.94$, $p = 0.02$, $\eta_p^2 = 0.25$, 95% CI = [−1.50, −0.18]。脑区主效应显著, 头皮中前部依次比中部和中后部诱发更大的 N400 波幅, $F(1, 21) = 40.38$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.80$, 95% CI (头皮中前部 vs.头皮中部) = [−3.60, −1.97]; 95% CI (头皮中前部 vs.头皮中后部) = [−14.26, −9.01]; 95%

CI (头皮中部 vs.头皮中后部) = [−10.91, −6.79]。测验类型和脑区交互作用显著, $F(1, 21) = 13.92$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.58$, 进一步的简单效应分析发现, 在头皮中前部, 时间顺序记忆比来源记忆诱发了更大的 N400 波幅, $t(21) = −2.17$, $p = 0.04$, Cohen's $d = −0.46$, 95% CI = [−1.82, −0.04]; 在头皮中后部, 来源记忆则比时间顺序记忆诱发了更大的 N400 波幅, $t(21) = −2.96$, $p = 0.008$, Cohen's $d = −0.63$, 95% CI = [−1.97, −0.34]。其他二因素交互作用均不显著, $Fs < 3.10$, $ps > 0.07$。最重要的是, 三因素交互作用显著, $F(1, 21) = 11.09$, $p = 0.001$, $\eta_p^2 = 0.53$, 进一步的简单效应分析发现, 在时间顺序记忆测验中, 头皮中前部跨事件条件比事件内条件诱发更大的 N400 波幅, $t(21) = −2.60$, $p = 0.02$, Cohen's $d = −0.55$, 95% CI = [−4.24, −0.47]; 而在来源记忆测验中, 头皮中后部边界条件比非边界条件诱发更大的 N400 波幅, $t(21) = −3.89$, $p = 0.001$, Cohen's $d = −0.83$, 95% CI = [−2.68, −0.81]。具体结果见图 7。

P600 (600~1000 ms)

对不同条件下的 ERP 平均波幅进行 2 (条件: 跨事件/边界、事件内/非边界) × 2 (测验类型: 时间顺序记忆、来源记忆) × 3 (脑区: 中前部、中部、中后部)的重复测量方差分析。结果发现, 脑区主效应显著, 头皮中后部依次比中部和中前部诱发更大的 P600 波幅, $F(1, 21) = 32.00$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.76$, 95% CI (头皮中后部 vs.头皮中部) = [3.36, 5.76]; 95% CI (头皮中后部 vs.头皮中前部) = [5.07, 8.53]; 95% CI (头皮中部 vs.头皮中前部) = [1.53, 2.96]。测验类型和脑区交互作用显著, $F(1, 21) = 31.09$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.76$, 进一步的简单效应分析发现, 在头皮中前部, 来源记忆比时间顺序记忆诱发了更大的 P600 波幅, $t(21) = 3.13$, $p = 0.005$, Cohen's $d = 0.67$, 95% CI = [0.48, 2.37]; 在头皮中后部, 来源记忆则比时间顺序记忆诱发了更小的 P600 波幅, $t(21) = −5.07$, $p < 0.001$, Cohen's $d = −1.08$, 95% CI = [−3.28, −1.37]。条件和脑区交互作用显著, $F(1, 21) = 4.54$, $p = 0.02$, $\eta_p^2 = 0.31$, 进一步的简单效应分析发现, 在头皮中后部, 跨事件/边界条件比事件内/非边界条件诱发了更小的 P600 波幅, $t(21) = −2.82$, $p = 0.01$, Cohen's $d = −0.60$, 95% CI = [−1.80, −0.27]。其他主效应和交互作用均不显著, $Fs < 1.68$, $ps > 0.21$。具体结果见图 7。

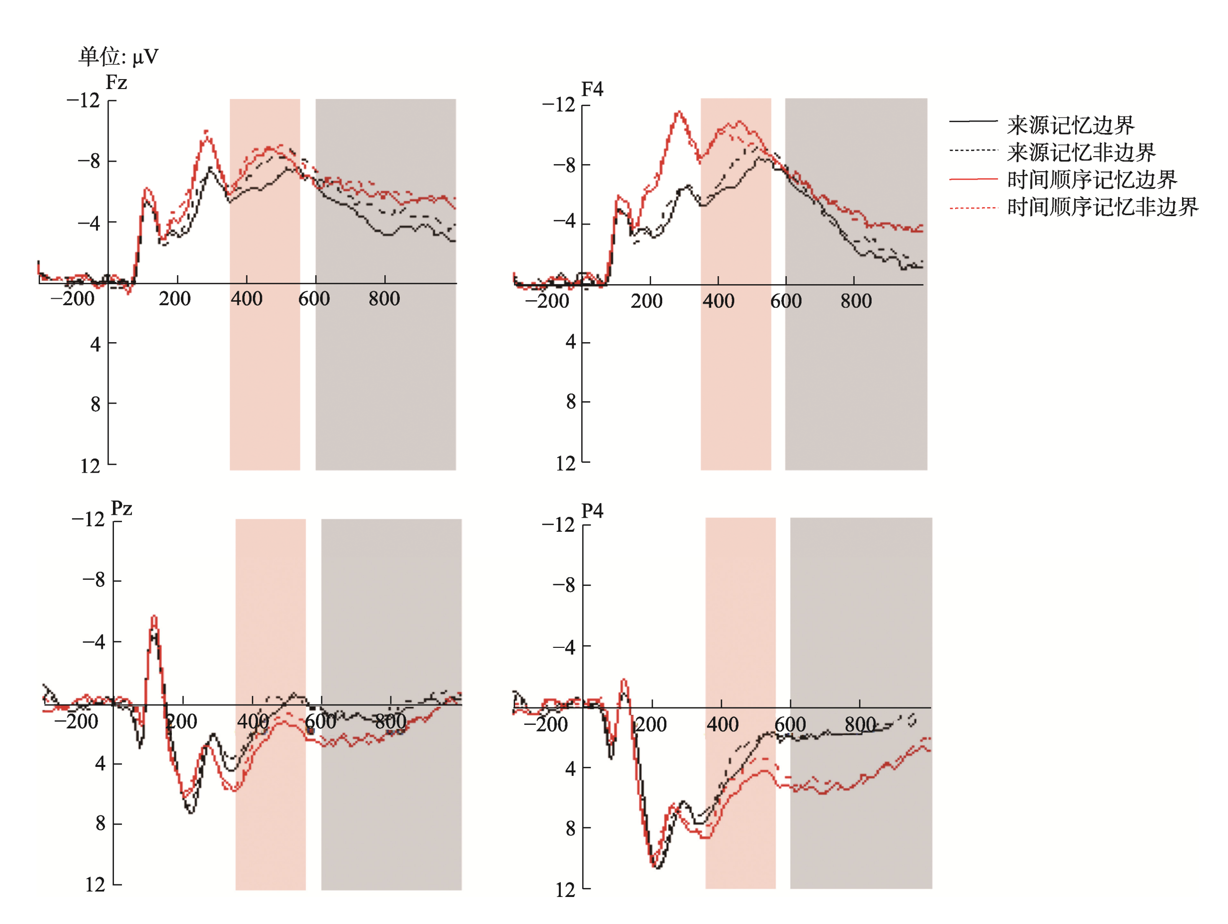


图 7　时间顺序记忆和来源记忆中各条件下的 N400 和 P600 波形(上图对应时间顺序记忆, 下图对应来源记忆)

4.3 讨论

实验 3 的行为结果与实验 2 一致，高 RPE 事件边界增强了边界处图片的来源记忆，同时削弱了跨事件图片对的时间顺序记忆，表现出了记忆权衡效应。ERP 结果表明，与事件内/非边界条件相比，跨事件/边界条件在进行记忆提取时诱发出更大的 N400 效应，并且两种记忆诱发出更大 N400 效应的部位不同，时间顺序记忆主要集中在头皮中前部，而来源记忆主要集中在头皮中后部，表明其激活的脑区在某种程度上存在差异。但是，跨事件/边界条件并未诱发出更大的 P600 效应，这与 Delogu 等人(2018)的研究结果不一致。

5 总讨论

本研究通过 3 个实验，分别从行为和神经生理机制层面，探讨了 RPE 事件边界对时间顺序记忆和来源记忆权衡效应的影响。本研究有三个主要结果：第一，内在的、具有社会性意义的 RPE 事件边界能够增强边界处信息的来源记忆；第二，不同的 RPE 强度对时间顺序记忆和来源记忆权衡效应的影响存在差异，仅高 RPE 强度条件能够产生记忆权衡效应；第三，相对于事件内/非边界条件，跨事件/边界条件的时间顺序记忆和来源记忆测验中诱发出更大 N400 效应，而且激活的脑区不同，前者主要集中在头皮中前部，后者主要集中在头皮中后部。

5.1 RPE 事件边界增强了边界处信息的来源记忆，却削弱了跨事件信息的时间顺序记忆

本研究拓展了 Rouhani 等人(2020)的研究发现，首次对 RPE 事件边界的来源记忆进行了测量，发现 RPE 事件边界能够增强边界处信息的来源记忆。当个体面对连续输入的信息时，对情境发生转换时的信息记忆的更加准确，这一结果支持了事件切割理论(event segmentation theory, EST) (Zacks et al., 2007)。该理论认为，个体在加工连续经验时，当前工作记忆激活的知觉表征存储在一个事件模型中保持相对稳定，免受其他信息的干扰，个体的行为受当前事件模型的指导并对随后输入的信息进行预测，如果随后输入的信息仍与当前事件模型匹配或一致，则感知预测是准确的，产生的预测误差较小；如果随后输入的信息是非预期、不可预测的，那么信息与当前事件模型就不再相关，此时预测误差瞬间增加，稳定的事件模型就会在此处被更新，从而产生了事件边界，创建了新的事件模型。事件模型更新时，个体能敏锐迅速地感知出其变化，并对事件模型更新时的信息投入更多的注意资源，从而增强了边界处信息与新情境之间的联结捆绑(Bladon et al., 2019; Howard et al., 2005; Zacks et al., 2007; Zacks et al., 2009)。此外，关于奖赏预测误差的神经生理机制研究表明，当非预期的奖赏信息出现时，中脑奖赏系统的腹侧被盖区产生大量多巴胺并投射至海马，海马回溯性地影响编码过的信息，导致长时程增强作用放大。因此，在时空上最接近非预期奖赏本身的那些信息在记忆中具有较高的优先级，从而产生较深的记忆痕迹(Braun et al., 2018; Carr et al., 2011; O’ Neill et al., 2010; Roumis & Frank, 2015)。实验 2 中，高 RPE 事件边界增强了边界处信息的来源记忆，削弱了跨事件信息的时间顺序记忆，表现出记忆权衡效应，这不仅与先前研究结果相一致(Clewett et al., 2020; Heusser et al., 2018)，而且也进一步支持了 EST。即在事件边界处，为了维持事件模型的更新，存储在前一事件模型中的信息会被自动地清除，个体很难对其进行回忆。因此，当 RPE 发生较大转换时，事件内的场景图片不再共享稳定的情境表征，正在进行的维持或整合过程遭到中断，如果提取信息分别位于不同的事件模型之中，就会导致跨事件模型的时间顺序记忆受损。

此外，不同于知觉、空间、目标、类别特征等外部环境变化导致的事件边界，个体很容易感知或觉察出事件之间的差异(DuBrow & Davachi, 2013; Heusser et al., 2018; Horner et al., 2016; Siefke et al., 2019)。个体内在心理状态，如情绪性、唤醒水平、生理状态等也被证明可以为事件切分提供额外的线索(Clewett et al., 2019, 2020; Dunsmoor et al., 2018)。RPE 是一种由当前的实际奖赏不符合预期所带来的内部心理体验，RPE 事件边界将个体先前与随后的经验分离，并在记忆中创建新的内在情境，体现的是情境中更深层次的变化(Rouhani et al., 2020)，我们推测 RPE 可能是一种内在的、具有社会性意义的事件边界。我们的研究表明，RPE 带来的内在心理状态的变化也会使得随后输入的信息不可预测，从而更新事件模型、形成事件边界来分离序列信息(Zacks et al., 2007)，并进一步对记忆的时间和非时间层面产生不同的影响。

5.2 事件边界的切分强度是影响时间顺序记忆和来源记忆权衡效应的重要因素

本研究首次对事件边界的切分强度进行了操作，研究发现，相对于低 RPE 强度条件，仅高 RPE 强度条件出现了记忆权衡效应，即高 RPE 事件边

界增强了边界处信息的来源记忆，同时削弱了跨事件信息的时间顺序记忆。尽管前人研究没有直接研究事件边界的切分强度对记忆的影响，但是许多研究的结果也侧面证明了这点。Gurguryan 等人(2020)在研究中，以相邻事件之间有无重叠特征来操作边界转换，分为相似转换和不同转换。具体来说，如果两个相邻事件的特征十分相似，个体不太容易区分出事件之间的差异，这时意味着存在重叠特征即相似转换；反之，如果两个相邻事件的特征差异很大，则表示无重叠特征即不同转换。测验阶段比较事件内、相似转换和不同转换条件下的时间顺序记忆，结果发现，不同转换条件下的时间顺序记忆显著低于事件内和相似转换条件，但事件内和相似转换条件之间的时间顺序记忆并不存在显著差异。这说明，当两个相邻事件模型之间具有相似或重叠表征时，并不能表现出强有力的切分效果，会降低对跨事件时间顺序记忆的削弱作用；而只有那些较大的转换，才能在边界处对事件进行切分，并对事件内的信息进行有效的整合(Polyn et al., 2009; Zacks et al., 2007)。同样地，在 Heusser 等人(2018)的研究中，也强调学习阶段每一个序列中所选取的颜色都是独特的、有区分度的。即同一序列中两个相邻事件的背景边框颜色的区分度较大，例如前一个事件的边框颜色是红色，则下一个事件的边框颜色可以是蓝色或绿色而不是橙色、黄色等，以尽量避免两个相邻事件的背景边框颜色在感知上出现相似的情况。此外，我们的结果也可以用事件视界模型(event horizon model) (Radvansky, 2012; Radvansky & Zacks, 2014)来解释。该模型认为，当事件之间具有相似性时，很难对某一个特定的事件进行提取。这是因为，有效的事件切分将具有相似特征的信息捆绑在一起，并在情境特征发生明显变化的时间点处建立事件边界(Newtson et al., 1977; Zacks et al., 2009)，从而减少记忆提取过程中信息间的竞争；而无效的事件切分则导致边界两侧的特征十分相似，加剧了记忆提取过程中信息间的竞争。我们的结果进一步说明，并非只要情境发生变化就能作为事件边界来影响时间顺序记忆和来源记忆，从而出现记忆权衡效应，只有当不同事件之间的差异表征足够大、事件边界的切分强度足够强时，这种此消彼长的记忆权衡效应才有可能会发生。

5.3　N400 成分可能反映了事件边界对情景记忆的整合与切分

先前关于事件边界的 ERP 研究相对较少，本研究深入探讨了高 RPE 事件边界对来源记忆与时间顺序记忆影响的神经生理机制。结果发现，与事件内/非边界条件相比，跨事件/边界条件诱发出更大的 N400 效应，该结果与 Zacks 等人(2007)关于事件边界的 N400 效应的推论相一致。他们认为，事件边界使得个体无法准确预测随后输入的信息，当语义信息与当前情境不匹配时，信息和事件模型的整合就比较困难，从而诱发出更大的 N400 效应，所以 N400 成分与事件边界密切相关。先前研究大多使用关键词失匹配范式探讨言语阅读过程中语义加工的 N400 成分(Kutas & Hillyard, 1980, 1984; van Berkum et al., 2003)。具体来说，当阅读过程中语境未变时，个体维持当前语境以理解句子的含义，当语境变化时，个体应用即时更新的语境来理解当前的句子，此时诱发出较大的 N400 效应。而本研究所采用的是序列学习中的事件边界范式，事件边界的作用就是对连续的信息进行切分。事件边界在切分连续信息时，事件内的信息会形成相对稳定的情境并存储在一个事件模型之中。位于事件边界两侧的信息分别存储在不同的事件模型之中，在提取过程中比较不同事件模型中的信息时，可能导致对情境关系的重构，因而产生较大的 N400 效应(Zacks et al., 2007)。显然，N400 成分并非仅限于言语阅读过程中的语义加工，而且还和长时记忆中语义信息的提取有关，体现的是一种更加广泛的语义关系提取加工(Federmeier & Kutas, 1999; Kutas & Federmeier, 2011)。跨事件/边界条件下的时间顺序记忆和来源记忆诱发出更大 N400 效应的脑区不同，前者主要集中在头皮中前部，后者主要集中在头皮中后部。此前，研究者针对时间顺序记忆和来源记忆开展了不同研究。Milner 等人(1991)发现当个体的额叶受损时，时间顺序记忆受到不同程度的削弱。Pouthas 等人(2000)通过使用 ERP 和 PET 技术相结合探究了时间感知中的脑成像问题，结果发现，右侧前额叶区域在时间判断中起着特定作用。所以，额叶对于时间信息的感知和编码过程具有重要意义。此外，关于来源记忆的 fMRI 研究表明，当正确地提取情景记忆中的来源信息时，大脑顶叶的活动会增强(Donaldson et al., 2010; Hayama et al., 2012; King & Miller, 2014)。可以说，顶叶区域的激活标志着来源记忆的成功提取。因此，在本研究中，时间顺序记忆和来源记忆分别作为记忆的时间和非时间层面的测量，当跨事件/边界条件下的信息提取较为困难时，分别伴随着头皮额叶和顶叶区域的

激活，诱发了更大的 N400 效应。

然而，本研究与 Delogu 等人(2018)出现了不一致的结果，本研究中并未发现跨事件/边界条件诱发出较大的 P600 效应。Delogu 等人(2018)探讨的是言语阅读过程中非预期词诱发的 P600 效应，侧重于探讨在语篇记忆中信息整合至新情境的过程，把 P600 成分看作是事件模型更新的标志。而本研究选取中性场景图片和价值数值作为记忆材料，以高 RPE 事件边界作为情境更新的操作，考察的是事件边界对记忆提取的影响。这说明，由情境变化导致的 P600 波幅的增加可能对言语的信息整合加工更敏感。而且，言语的信息整合加工与长时记忆的语义提取加工可能是两个完全平行独立的过程，由不同的系统加以控制。当然，这有待于在未来研究中进一步探讨。

6 结论

(1) 内在的、具有社会性意义的 RPE 可以作为事件边界，而且增强了边界处信息的来源记忆；

(2) 事件边界的切分强度是影响时间顺序记忆和来源记忆权衡效应出现的重要因素；

(3) N400 成分可能是反映事件边界对情景记忆的整合与切分的重要指标。

参 考 文 献

Bai, L., Ma, H., Huang, Y. X., & Luo, Y. J. (2005). The development of native Chinese affective picture system-A pretest in 46 college students. *Chinese Mental Health Journal*, *19*(11), 719−722.

[白露, 马慧, 黄宇霞, 罗跃嘉. (2005). 中国情绪图片系统的编制—在 46 名中国大学生中的试用. *中国心理卫生杂志*, *19*(11), 719−722.]

Ben-Yakov, A., Smith, V., & Henson, R. (2022). The limited reach of surprise: Evidence against effects of surprise on memory for preceding elements of an event. *Psychonomic Bulletin & Review*, *29*(3), 1053−1064.

Bladon, J. H., Sheehan, D. J., de Freitas, C. S., & Howard, M. W. (2019). In a temporally segmented experience hippocampal neurons represent temporally drifting context but not discrete segments. *Journal of Neuroscience*, *39*(35), 6936−6952.

Braun, E. K., Wimmer, G. E., & Shohamy, D. (2018). Retroactive and graded prioritization of memory by reward. *Nature Communications*, *9*(1), 1−12.

Carr, M. F., Jadhav, S. P., & Frank, L. M. (2011). Hippocampal replay in the awake state: A potential substrate for memory consolidation and retrieval. *Nature Neuroscience*, *14*(2), 147−153.

Clewett, D., & Davachi, L. (2017). The ebb and flow of experience determines the temporal structure of memory. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, *17*, 186−193.

Clewett, D., DuBrow, S., & Davachi, L. (2019). Transcending time in the brain: How event memories are constructed from experience. *Hippocampus*, *29*(3), 162−183.

Clewett, D., Gasser, C., & Davachi, L. (2020). Pupil-linked arousal signals track the temporal organization of events in memory. *Nature Communications*, *11*(1), 4007.

Davachi, L., & DuBrow, S. (2015). How the hippocampus preserves order: The role of prediction and context. *Trends in Cognitive Sciences*, *19*(2), 92−99.

Davis, E. E., Chemnitz, E., Collins, T. K., Geerligs, L., & Campbell, K. L. (2021). Looking the same, but remembering differently: Preserved eye-movement synchrony with age during movie watching. *Psychology & Aging*, *36*(5), 604−615.

Delogu, F., Drenhaus, H., & Crocker, M. W. (2018). On the predictability of event boundaries in discourse: An ERP investigation. *Memory & Cognition*, *46*(2), 315−325.

DeLong, K. A., Urbach, T. P., & Kutas, M. (2005). Probabilistic word pre-activation during language comprehension inferred from electrical brain activity. *Nature Neuroscience*, *8*(8), 1117−1121.

Donaldson, D. I., Wheeler, M. E., & Petersen, S. E. (2010). Remember the source: Dissociating frontal and parietal contributions to episodic memory. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *22*(2), 377−391.

DuBrow, S., & Davachi, L. (2013). The influence of context boundaries on memory for the sequential order of events. *Journal of Experimental Psychology: General*, *142*(4), 1277−1286.

Dunsmoor, J. E., Kroes, M. C., Moscatelli, C. M., Evans, M. D., Davachi, L., & Phelps, E. A. (2018). Event segmentation protects emotional memories from competing experiences encoded close in time. *Nature Human Behaviour*, *2*(4), 291−299.

Ezzyat, Y., & Davachi, L. (2011). What constitutes an episode in episodic memory? *Psychological Science, 22*(2), 243−252.

Ezzyat, Y., & Davachi, L. (2014). Similarity breeds proximity: Pattern similarity within and across contexts is related to later mnemonic judgments of temporal proximity. *Neuron*, *81*(5), 1179−1189.

Ezzyat, Y., & Davachi, L. (2021). Neural evidence for representational persistence within events. *Journal of Neuroscience, 41*(37), 7909−7920.

Federmeier, K. D., & Kutas, M. (1999). A rose by any other name: Long-term memory structure and sentence processing. *Journal of Memory and Language*, *41*(4), 469−495.

Gurguryan, L., Dutemple, E., & Sheldon, S. (2020). Conceptual similarity alters the impact of context shifts on temporal memory. *Memory*, *29*(1), 11−20.

Hayama, H. R., Vilberg, K. L., & Rugg, M. D. (2012). Overlap between the neural correlates of cued recall and source memory: Evidence for a generic recollection network? *Journal of Cognitive Neuroscience*, *24*(5), 1127−1137.

Heusser, A. C., Ezzyat, Y., Shiff, I., & Davachi, L. (2018). Perceptual boundaries cause mnemonic trade-offs between local boundary processing and across-trial associative binding. *Journal of Experimental Psychology: Learning Memory & Cognition*, *44*(7), 1075−1090.

Horner, A. J., Bisby, J. A., Wang, A., Bogus, K., & Burgess, N. (2016). The role of spatial boundaries in shaping long-term event representations. *Cognition*, *154*, 151−164.

Howard, M. W., Fotedar, M. S., Datey, A. V., & Hasselmo, M. E. (2005). The temporal context model in spatial navigation and relational learning: Toward a common explanation of medial temporal lobe function across domains. *Psychological Review*, *112*(1), 75−116.

Jang, A. I., Nassar, M. R., Dillon, D. G., & Frank, M. J. (2019).

Positive reward prediction errors during decision-making strengthen memory encoding. *Nature Human Behaviour*, *3*(7), 719−732.

King, D. R., & Miller, M. B. (2014). Lateral posterior parietal activity during source memory judgments of perceived and imagined events. *Neuropsychologia*, *53*, 122−136.

Kutas, M., & Federmeier, K. D. (2011). Thirty years and counting: Finding meaning in the N400 component of the event-related brain potential (ERP). *Annual Review of Psychology*, *62*(1), 621−647.

Kutas, M., & Hillyard, S. A. (1980). Reading senseless sentences: Brain potentials reflect semantic incongruity. *Science*, *207*(4427), 203−205.

Kutas, M., & Hillyard, S. A. (1984). Brain potentials during reading reflect word expectancy and semantic association. *Nature*, *307*(5947), 161−163.

Lang, P. J., Bradley, M. M., & Cuthbert, B. N. (2008). *International affective picture system (IAPS): Affective ratings of pictures and instruction manual*. University of Florida, Gainesville. In.: Tech Rep A-8.

Lin, J., Pype, A., Murray, S., & Boynton, G. (2010). Encoding of a scene into memory is enhanced at behaviorally relevant points in time. *Journal of Vision*, *10*(7), 754−754.

Lisman, J., Grace, A. A., & Duzel, E. (2011). A neoHebbian framework for episodic memory; role of dopamine-dependent late LTP. *Trends in Neurosciences*, *34*(10), 536−547.

Milner, B., Corsi, P., & Leonard, G. (1991). Frontal-lobe contribution to recency judgements. *Neuropsychologia*, *29*(6), 601−618.

Newtson, D., Engquist, G. A., & Bois, J. (1977). The objective basis of behavior units. *Journal of Personality and Social Psychology*, *35*(12), 847−862.

O' Neill, J., Pleydell-Bouverie, B., Dupret, D., & Csicsvari, J. (2010). Play it again: Reactivation of waking experience and memory. *Trends in Neurosciences*, *33*(5), 220−229.

Polyn, S. M., Norman, K. A., & Kahana, M. J. (2009). A context maintenance and retrieval model of organizational processes in free recall. *Psychological Review*, *116*(1), 129−156.

Pouthas, V., Garnero, L., Ferrandez, A. M., & Renault, B. (2000). ERPs and PET analysis of time perception: Spatial and temporal brain mapping during visual discrimination tasks. *Human Brain Mapping*, *10*(2), 49−60.

Radvansky, G. A. (2012). Across the event horizon. *Current Directions in Psychological Science*, *21*(4), 269−272.

Radvansky, G. A., & Zacks, J. M. (2014). *Event Cognition*. New York: Oxford University Press.

Radvansky, G. A., & Zacks, J. M. (2017). Event boundaries in memory and cognition. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, *17*, 133−140.

Rouhani, N., Norman, K. A., Niv, Y., & Bornstein, A. M. (2020). Reward prediction errors create event boundaries in memory. *Cognition*, *203*, 104269.

Roumis, D. K., & Frank, L. M. (2015). Hippocampal sharp-wave ripples in waking and sleeping states. *Current Opinion in Neurobiology*, *35*, 6−12.

Schultz, W., Dayan, P., & Montague, P. R. (1997). A neural substrate of prediction and reward. *Science*, *275*(5306), 1593−1599.

Siefke, B. M., Smith, T. A., & Sederberg, P. B. (2019). A context-change account of temporal distinctiveness. *Memory & Cognition*, *47*(6), 1158−1172.

Sitnikova, T., Kuperberg, G., & Holcomb, P. J. (2003). Semantic integration in videos of real-world events: An electrophysiological investigation. *Psychophysiology*, *40*(1), 160−164.

Tulving, E. (1983). *Elements of episodic memory*. London: Oxford University Press.

Tulving, E. (2002). Episodic memory: From mind to brain. *Annual Review of Psychology*, *53*(1), 1−25.

van Berkum, J. J., Zwitserlood, P., Hagoort, P., & Brown, C. M. (2003). When and how do listeners relate a sentence to the wider discourse? Evidence from the N400 effect. *Cognitive Brain Research*, *17*(3), 701−718.

van de Ven, V., Jäckels, M., & de Weerd, P. (2022). Time changes: Timing contexts support event segmentation in associative memory. *Psychonomic Bulletin & Review*, *29*(2), 568−580.

West, W. C., & Holcomb, P. J. (2002). Event-related potentials during discourse-level semantic integration of complex pictures. *Cognitive Brain Research*, *13*(3), 363−375.

Zacks, J. M., Speer, N. K., & Reynolds, J. R. (2009). Segmentation in reading and film comprehension. *Journal of Experimental Psychology: General*, *138*(2), 307−327.

Zacks, J. M., Speer, N. K., Swallow, K. M., Braver, T. S., & Reynolds, J. R. (2007). Event perception: A mind-brain perspective. *Psychological Bulletin*, *133*(2), 273−293.

Zacks, J. M., Tversky, B., & Iyer, G. (2001). Perceiving, remembering, and communicating structure in events. *Journal of Experimental Psychology: General*, *130*(1), 29−58.

The effect of reward prediction errors on temporal order and source memory

ZHANG Hongchi, CHENG Xuan, MAO Weibin

(*School of Psychology, Shandong Normal University, Jinan 250358, China*)

Abstract

The human brain automatically segments continuous experiences into discrete events to better remember ongoing experiences in daily life. This automatic process is known as event segmentation. The time points between different events are called event boundaries—they indicate when one event ends, and another begins. Studies have shown that the event boundaries may enhance the item-context source memory of information at the boundaries but impair temporal order memory in across-event information. Notably, previous studies mainly

focused on the boundaries caused by changes in the external environment and rarely paid attention to the subjective boundaries caused by changes in an individual's internal psychological context. Moreover, Rouhani et al. (2020) first confirmed that reward prediction errors (RPE) could be used as event boundaries to influence memory. Additionally, it has been demonstrated that the RPE event boundary reduces the temporal order memory in across-event information. However, the effects of the RPE event boundary on temporal order and source memory and whether the mnemonic trade-off effect exists are not clear. The neurophysiological mechanisms underlying the effects of event boundaries on memory require further examination.

This study used behavioral and event-related potentials (ERP) technology in three experiments to explore the effect of RPE event boundaries on temporal order and source memory, respectively, based on behavioral and neurophysiological mechanisms. Experiment 1 used a neutral scene picture matching value as materials. The value of successive pictures fluctuates around an average value to form an event, and event boundaries denote when there is a significant shift in the value, which is the reward prediction error. The participants were required to complete two memory tests: a temporal order memory test and a source memory test. The source memory test was presented with a neutral scene picture, and participants were asked to choose a value that matched the learning stage from the two alternatives. We aimed to explore the effect of the RPE event boundary on temporal order and source memory. However, no mnemonic trade-off effect was observed. Therefore, whether other factors might influence the mnemonic trade-off effect that exists is not clear. In Experiment 2, RPE was divided into high and low strength. We aimed to explore the effects of different RPE strengths on temporal order and source memory. After we obtained stable results, in Experiment 3, we used ERP technology to explore the N400 and P600 effects under different conditions at the memory retrieval stage in the high RPE condition to examine the detailed mechanism of the effect of event boundary on memory.

The behavioral results showed that the RPE event boundary enhanced only the neutral scene picture-value source memory of information at the boundaries in Experiment 1. High and low RPE event boundaries affect temporal order and source memory differently. The high RPE event boundary enhanced the neutral scene picture-value source memory of information at the boundaries. Further it reduced the temporal order memory of information across-events, which caused the mnemonic trade-off effect between temporal order and source memory in Experiment 2. The ERP results showed that compared to the within-event/non-boundary condition, correctly retrieving information of temporal order and source memory in the across-event/boundary condition induced a larger N400 (350−550ms) effect but did not induce a larger P600 (600−1000ms) effect in Experiment 3. These two memory tests were activated in different brain regions. The temporal order memory in the across-events condition was mainly activated in the anterior region, while the source memory boundary condition was mainly activated in the parietal region.

This study can be summarized as follows. The segmentation strength of the event boundary is an important factor affecting the mnemonic trade-off effect between temporal order and source memory. The mnemonic trade-off effect only occurs when the representation difference between events is sufficiently vast, and the segmentation strength of the boundary is sufficiently high. Furthermore, the N400 component is an important index that reflects the integration and segmentation of episodic memory using event boundaries.

Keywords reward prediction errors, event boundaries, temporal order memory, source memory, mnemonic trade-off effect